DOI:10.11931/guihaia.gxzw201803052

浮床植物多样性及组合影响生活污水的净化效果

廖建雄*，曾丹娟，姚月锋，蒲高忠，莫凌，张德楠
（广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西壮族自治区
中国科学院广西植物研究所，广西 桂林，541006）

摘要：生态浮床系统是目前水环境综合治理领域的研究和应用热点。为研究其植物多样性及组合对生活污水净化的影响，本文以芦竹为建群种和优势种构建 5 个多样性水平及 2 种组合模式，比较分析了它们的植株生长、系统生产力及 N、P、COD 去除率。结果发现，随着多样性的增加，芦竹等湿地植物的单株生物量及相对生长速率（RGR）呈下降趋势，但中生植物的生存与生长受到促进。系统生产力随多样性的增加呈下降趋势，而 N、P、COD 去除率随多样性增加而显著增加。在同一多样性水平下，中生植物种占多数的组合虽然系统生产力低于湿地植物种占多数的组合，但前者的 N、P、COD 去除率高于后者。同一多样性及组合条件下，P 去除率最高，N 去除率次之，COD 去除率最低。随着生态浮床系统建立时间的增加，N、P、COD 去除率呈现先快速增加后缓慢降低的趋势。以上结果说明生态浮床系统中植物多样性及组合影响生活污水的净化效果，除了植物直接吸收与吸附外，微生物的去除作用可能更为重要。

关键词：生态浮床，芦竹，氮，磷，COD

中图分类号：X52，X173　文献标识码：A

Plant diversity and composition of ecological floating bed affect domestic sewage purification

LIAO Jianxiong, ZENG Danjuan, YAO Yuefeng, PU Gaozhong, MO Ling, ZHANG Denan
(*Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain*, *Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: Ecological floating bed system has been the hotspot of research and application in the comprehensive management of polluted water environment. In order to analyze the effects of its plant diversity and composition on purification of domestic sewage, this study established five species richness levels and two composition arrangements by using *Arundo donax* as dominant

---

基金项目：广西科技计划项目重点研发计划（桂科 AB16380250）；广西科学研究与技术开发计划项目主席科技资金（1324105）；国家自然科学基金地区科学基金项目（31560089）；广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金（16-380-32）[Supported by the Key Science and Technology Program of Guangxi (Guike AB16380250); the Chairman Science and Technology Foundation of Guangxi (1324105); the National Natural Science Foundation of China (31560089); the Fund of Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain (16-380-32)]。

作者简介：廖建雄，男，湖南湘阴人，博士，副研究员，主要从事环境生态学研究，（E-mail）liaojianx@163.com。
* **通信作者**

and constructive species, and measured the plant growth, system productivity and N, P, COD removal. The results indicated that the individual biomass and relative growth rate (RGR) of wetland plants (such as *A. donax*) decreased with increasing species richness, while the survival and growth of mesophytes were promoted. Higher species richness decreased the productivity of the system, but increased significantly the removal of N, P and COD. At the same level of species richness, the composition with more mesophytes had lower system productivity than that with more wetland plant species, but the former had higher N, P and COD removal. Under the same species richness and composition, P removal was highest, N removal was followed, and COD removal was lowest. Moreover, their removal showed a trend of slow decline after rapid increase with time. These results showed that the species richness and combination of ecological floating bed system can affect domestic sewage purification. In the process, pollutants can be removed by direct absorption and adsorption of plants, but the role of microorganisms may be more important.
Keywords: ecological floating bed, *Arundo donax*, N, P, COD

随着城镇规模的扩大及经济的高速发展，逐年增加的生活污水不但加剧了江河湖泊的水质恶化和地下水污染，而且已严重威胁城乡居民的生存环境和经济社会的可持续发展。因此，如何有效净化生活污水已成为人们普遍关心的科学问题（Schindler，2012；Finlay et al，2013）。

与传统理化方法及人工湿地相比，生态浮床技术投资小、操作易，而且可以营造水上景观且带来一定的经济效益，目前已成为水环境综合治理领域的研究和应用热点（张志勇等，2007）。生态浮床的关键因素是植物，它们具有不同的生物学特性及净化机理与偏好，因此植物的选择与组合是生态浮床技术的重中之重。已有许多研究发现，多种植物组合一般比单种植物更能有效地净化水体（李莎莎等，2010；胡智锋等，2016）。而且，植物多样性越高，净化效应越强（Zhu et al，2010；Liang et al，2011；Zhang et al，2011；Chang et al，2014）。然而，这些研究主要限于人工湿地且主要去除对象为氮（N）。大多数情况下，磷（P）是水体富营养化的最主要因素（Xie，2003；Finlay et al，2013；Yan et al，2016），而有机污染物易引发水体黑臭（于玉彬和黄勇，2010）。同时，在研究植物多样性及组合对水体的净化效应时，生态浮床不但比人工湿地更容易操作，而且可适用于各种深度的水体（廖建雄等，2018）。因此，利用生态浮床研究植物多样性及组合对生活污水 N、P 及有机污染物的去除效应，将更具理论与实用意义。

在植物多样性与生态系统功能的关系研究中，很多研究者混淆了物种组合效应与物种丰富度效应（Huston，1997）。因此，在控制植物多样性的同时，同一多样性水平设置不同的物种组合是比较合理的方式。另外，我们的前期的研究发现，芦竹（*Arundo donax*）不但适生于各种污染水体，而且其 N、P 去除率很高（Liao et al，2017）。然而，邻体植物对芦竹的影响鲜有文献报道（Curt et al，2017）。因此，本研究设计了以芦竹为生态浮床建群种的 5 个多样性水平，其中 3 个多样性水平设置了 2 种组合。目的是分析植物多样性及组合对植株生长、系统生产力及生活污水 N、P 和 COD 去除率的影响，并依此为综合处理生活污水的生态浮床技术的改进提供理论指导。

1. 材料与方法

1.1 实验材料及设计

实验在广西植物研究所的遮雨大棚中进行。实验期间（2014 年 9 月 10 日—10 月 29，共 49 d），棚内平均昼/夜气温 30.0/21.2 ℃，相对湿度 77.3%。实验开始前，选取 5 种湿地植物（芦竹、黄花鸢尾 *Iris wilsonii*、翠芦莉 *Ruellia brittoniana*、海芋 *Alocasia macrorrhiza*、水毛花 *Scirpus triangulatus*）与 4 种中生植物（苎麻 *Boehmeria nivea*、凤尾蕨 *Pteris cretica* var.

nervosa、商陆 *Phytolacca acinosa*、向日葵 *Helianthus annuus*）为实验物种，其中芦竹为组培苗、翠芦莉为扦插苗，向日葵为播种苗，其它为野生苗或通过分株产生。待大部分植物的苗高约 20 cm 时，将它们的根洗净，然后置于自来水中预培养 1 周。

购买 300 L 塑料水箱（口部长宽 86 cm × 65 cm，底部长宽 70 cm ×50 cm，深 62 cm）18 个，埋入土中约 50 cm 以减小水温受气温的影响。取来自桂林市雁山区生活污水渠的生活污水（N、P、COD 浓度分别为 39.89、4.24、413.37 mg·L^{-1}），加入水箱中至与地表平齐（约 270 L），并每隔一天加自来水以补充蒸发的水分（通过一个下垂的浮标衡量）。生态浮床模拟在我们专利（廖建雄等，2018）的基础上进行改进。首先选取大小相对一致的预培养植株，用 100 cm × 7 cm × 2 cm 高密度 PU 海绵条绕缠茎基处后固定于 17 cm × 15.3 cm（口径×高）双色 PP 花盆中，然后移至浮于水箱的 PS 挤塑板的栽植孔中。挤塑板为正方形，边长 60 cm，厚 3 cm，上面均匀打有 9 个直径 16 cm 的栽植孔。因此，每水箱可放置 9 株植物。除对照水箱放置挤塑板及带海绵条的花盆但不种任何植物外，其余水箱以芦竹为建群种分别放置 1、3、5、7、9 种植物（表 1）。其中物种数为 3、5、7 时又设置两种组合，即湿地植物种占多数组合和中生植物种占多数组合。多种植物栽植时，芦竹外其它物种每种只栽植 1 株植物，且尽量将多株芦竹间隔开来。每个多样性及组合重复 2 次，且重复的 2 个水箱彼此不相邻。

表 1 植物多样性及组合设计

Table 1 Design of plant species diversity and composition in the experiment

植物多样性 Species richness	物种组合 Species composition
0	-
1	9 芦
3 w	7 芦+ 1 鸢+ 1 翠
3 m	7 芦+ 1 商+ 1 葵
5 w	5 芦+ 1 鸢+ 1 翠+ 1 芋+ 1 水
5 m	5 芦+ 1 苎+ 1 蕨+ 1 商+ 1 葵
7 w	3 芦+ 1 鸢+ 1 翠+ 1 芋+ 1 水+ 1 苎+ 1 蕨
7 m	3 芦+ 1 芋+ 1 水+ 1 苎+ 1 蕨+ 1 商+ 1 葵
9	1 芦+ 1 鸢+ 1 翠+ 1 芋+ 1 水+ 1 苎+ 1 蕨+ 1 商+ 1 葵

注：芦、鸢、翠、芋、水、苎、蕨、商、葵分别代表芦竹、黄花鸢尾、翠芦莉、海芋、水毛花、苎麻、凤尾蕨、商陆、向日葵，其中前 5 种为湿地植物，后 4 种为中生植物。物种前数字表示株数，w 与 m 分别表示湿地种占多数组合与中生种占多数组合。

Note: *Arundo donax*, *Iris wilsonii*, *Ruellia brittoniana*, *Alocasia macrorrhiza*, *Scirpus triangulatus* are wetland plants and *Boehmeria nivea*, *Pteris cretica* var. *nervosa*, *Phytolacca acinosa*, *Helianthus annuus* are mesophytes. Numbers prior to species name represent the number of plants. w and m represent species composition with more wetland plants and mesophytes, respectively.

1.2 取样及测量

生态浮床系统建立后，每隔 1 周取一次水样，共 7 次。取水样时，统一于早上 9 点左右进行，用医用注射器于水箱四角水面 12 cm 下各抽取约 50 mL 水样后混匀。其中 N 与 P 分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法（HJ 636-2012）与钼酸铵分光光度法（GB 11893-89）进行测量，COD 采用 Hach 试剂及 DR1010 COD 测定仪（美国）进行测量。每次水样测量后，各水箱的 N、P、 COD 去除率根据$(C_{ck}-C_1)/C_0\times100$进行计算（Liao et al，2017），其中 C_0 为生活污水的初始浓度，C_{ck} 与 C_1 分别为无植物水箱（对照）与有植物水箱的生活污水的浓度。

预培养植物移入水箱前，先测量其初始鲜重，然后根据备用植株的干鲜比估算初始干重（DW_0）。49 d 后，将每株植物洗净后装入信封，105 ℃固定杀青 20 min 且继续 80 ℃烘至少 24 h 后，称重得干重 DW。每株植物的相对生长速率（RGR，mg g^{-1} d^{-1}）根据($\ln DW-\ln DW_0$)/49 ×1 000 计算，而每水箱的生产力（mg d^{-1}）根据(收获总生物量-初始总生物量)/49 ×1 000 计算（Garnier et al，2004）。

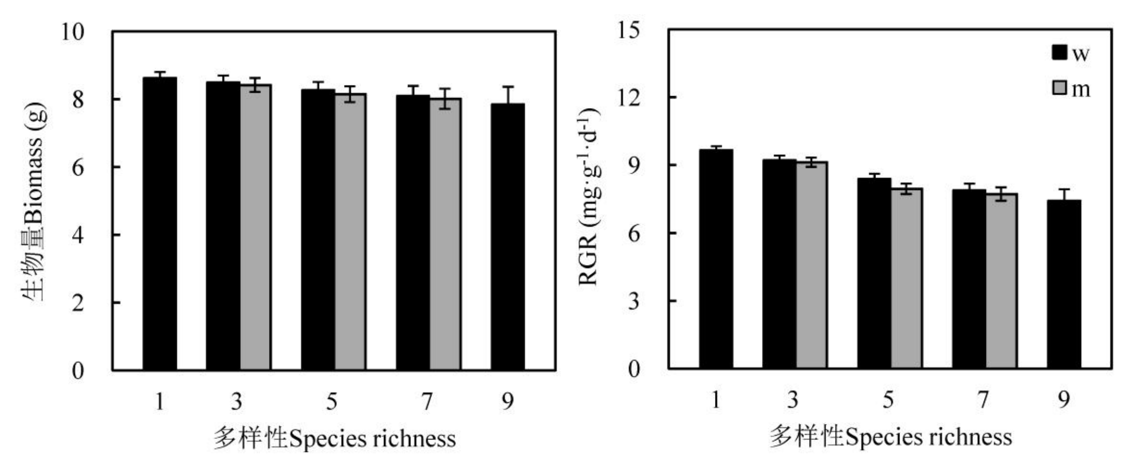
1.3 统计方法

所有数据处理与分析均利用 SPSS 20.0 软件（SPSS Inc., Chicago, USA）完成。由于植物收获时单株生物量、RGR 与 DW_0 有关，系统生产力与 N、P、COD 去除率与系始初始总生物量有关，因此，尽管同一物种植株初始大小类似，但为了抵消植株大小效应的影响，分析植物多样性及组合对单株生物量、RGR 及系统生产力的影响采用单因素协方差分析（one-way ANCOVA），植物多样性及组合与取样时间对系统 N、P、COD 去除率的影响采用双因素协方差分析（two-way ANCOVA），其中植物单株生物量与 RGR 以 DW_0 为协变量，系统生产力及 N、P、COD 去除率以系统初始总生物量为协变量。当主效应差异显著时，随后的多重比较用 LSD 法进行检验；当交互作用显著时，同一多样性水平不同取样时间的差异显著性比较采用 one-way ANCOVA。同一多样性及组合条件下， N、P、COD 去除率之间的比较采用配对样本 T 检验。

2. 结果

2.1 植物单株生物量与相对生长速率

4 种中生植物的单株生物量与 RGR 均随植物多样性的增加而增加，其中商陆、向日葵的单株生物量与 RGR，苎麻的 RGR 增加显著（表 2）。5 种湿地植物的单株生物量与 RGR 对植物多样性的响应不同，其中芦竹与海芋随多样性的增加而下降，而黄花鸢尾随多样性的增加而增加，但统计上均不显著（表 2，图 1）。



注：w 与 m 分别表示湿地种占多数组合与中生种占多数组合。数据为单因素协方差分析后的修正平均值±标准误。各多样性及组合间差异不显著（*P*>0.05）。

Note: w and m represent species composition with more wetland plants and mesophytes, respectively. Data are adjusted $\bar{x}$ $\pm\bar{x}_s$ from one-way ANCOVA. In each panel, the differences among species richness and composition were not significant (*P*>0.05).

图 1 植物多样性及组合对芦竹单株生物量与相对生长速率（RGR）的影响

Fig. 1 Effects of species diversity and composition on individual biomass and relative growth rate (RGR) of *Arundo donax*

表 2 植物多样性及组合对 8 种植物单株生物量与相对生长速率（RGR）的影响

Table 2 Effects of species diversity and composition on individual biomass and relative growth rate (RGR) of 8 plant species

植物种类 Species	单株生物量 Individual biomass（g）					RGR（mg g^{-1} d^{-1}）				
	3	5	7 w	7 m	9	3	5	7 w	7 m	9
黄花鸢尾 *Iris wilsonii*	6.62 ±0.51	6.97 ±0.50	7.20 ±0.51	-	7.26 ±0.50	2.56 ±0.55	3.91 ±0.52	4.69 ±0.53	-	4.85 ±0.51
翠芦莉 *Ruellia brittoniana*	6.32 ±0.54	6.12 ±0.65	6.20 ±0.59	-	6.05 ±0.67	2.48 ±0.07	2.91 ±0.04	2.63 ±0.11	-	2.87 ±0.11
海芋 *Alocasia macrorrhiza*	-	10.18 ±0.57	9.50 ±0.54	9.21 ±0.56	9.16 ±0.59	-	9.97 ±1.66	8.50 ±1.12	8.12 ±1.66	7.98 ±1.70
水毛花 *Scirpus triangulatus*	-	5.52 ±0.66	5.51 ±0.78	5.47 ±0.69	5.65 ±0.65	-	1.77 ±0.14	2.53 ±0.09	1.98 ±0.16	1.96 ±0.15
苎麻 *Boehmeria nivea*	-	6.61 ±0.58	6.66 ±0.57	6.64 ±0.58	6.67 ±0.58	-	1.80 ±0.08[b]	2.35 ±0.16[a]	2.10 ±0.08[ab]	2.48 ±0.09[a]
凤尾蕨 *Pteris cretica* var. *nervosa*	-	6.15 ±0.52	6.21 ±0.51	6.18 ±0.51	6.28 ±0.52	-	0.52 ±0.08	0.75 ±0.12	0.57 ±0.13	0.98 ±0.13
商陆 *Phytolacca acinosa*	6.21 ±0.30[b]	6.30 ±0.32[b]	-	6.69 ±0.33[a]	6.76 ±0.33[a]	1.27 ±0.18[c]	1.32 ±0.23[bc]	-	1.51 ±0.19[ab]	1.60 ±0.14[a]
向日葵 *Helianthus annuus*	5.65 ±0.52[c]	5.83 ±0.53[bc]	-	6.29 ±0.54[ab]	6.72 ±0.56[a]	1.50 ±0.22[c]	1.66 ±0.22[bc]	-	1.89 ±0.22[ab]	2.05 ±0.11[a]

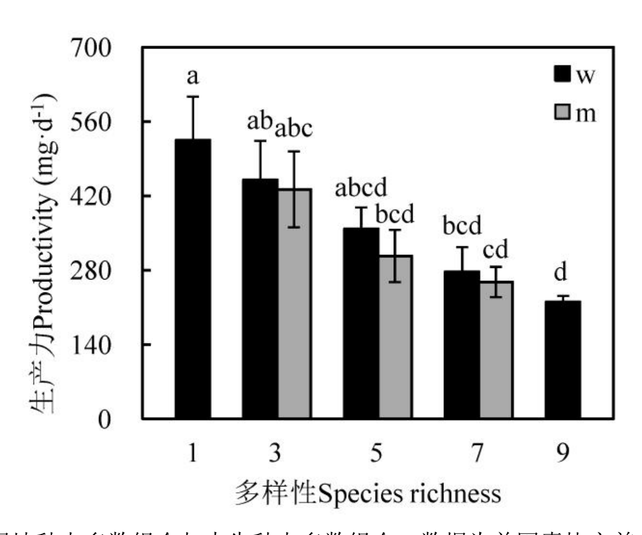
注：7 w 与 7 m 表示物种多样性为 7 时湿地种与中生种分别占多数的组合；数据为单因素协方差分析后的修正平均值±标准误；同一行不同字母表示多样性及组合间差异显著（*P*<0.05）。

Note: 7 w and 7 m represent species composition with more wetland plants and mesophytes, respectively. Data are adjusted $\bar{x} \pm \bar{x}_s$ from one-way ANCOVA. Different letters in each row indicate significant differences among species richness and composition (*P*<0.05).

根据实验设计，植物多样性为 3、5、7 时各有两种组合（湿地种占多数与中生种占多数），其中芦竹在这 3 种多样性及组合中都有设计，而海芋、水毛花、苎麻、凤尾蕨在多样性为 7 及组合中都有设计（表 1）。然而，同一多样性水平下，不同组合对这 5 种植物的单株生物量与 RGR 均无显著的影响。但总体而言，湿地种占多数的组合增加了这些植物的单株生物量与 RGR（表 2，图 1）。

2.2 系统生产力

随着植物多样性的增加，系统生产力呈显著降低的趋势（图 2）。同一多样性水平下，尽管不同组合间系统生产力差异不显著，但总体上湿地植物种占多数的组合高于中生植物占多数的组合。



注：w 与 m 分别表示湿地种占多数组合与中生种占多数组合。数据为单因素协方差分析后的修正平均值±标准误。不同字母表示多样性及组合间差异显著（P<0.05）。

Note: w and m represent species composition with more wetland plants and mesophytes, respectively. Data are adjusted $\bar{x}$ $\pm \bar{x}_s$ from one-way ANCOVA. Different letters indicate significant differences among species richness and composition (P<0.05).

图 2 植物多样性及组合对生产力的影响

Fig. 2 Effect of species diversity and composition on productivity

2.3 N、P、COD 去除率

植物多样性及组合对生活污水 N、P、COD 去除率均有显著的影响（表 3）。随着植物多样性的增加， N、P、COD 去除率显著增加。在同一多样性水平下，中生植物种占多数组合的 N 去除率显著高于湿地植物种占多数组合。COD 与 P 去除率虽然同一多样性不同组合之间差异不显著，但总体而言，中生植物种占多数的组合高于湿地植物种占多数的组合。

处理时间对生活污水 N、P、COD 去除率也均有显著的影响（图 3）。随着处理时间的增加， N、P、COD 去除率均呈现先快速增加后缓慢降低的趋势。其中，植物多样性为 9 时它们的最高值出现在第 4 周，而在其它多样性水平及组合中，它们的最高值出现在第 3 周。

同一多样性及组合条件下，P 去除率最高， N 去除率次之，COD 去除率最低（图 3）。其中，湿地植物种占多数时，P 去除率显著高于 N 去除率，但 N 去除率与 COD 去除率差异不显著（表 3）。相反，中生植物种占多数时，P 去除率与 N 去除率差异不显著，但 N 去除率显著高于 COD 去除率。

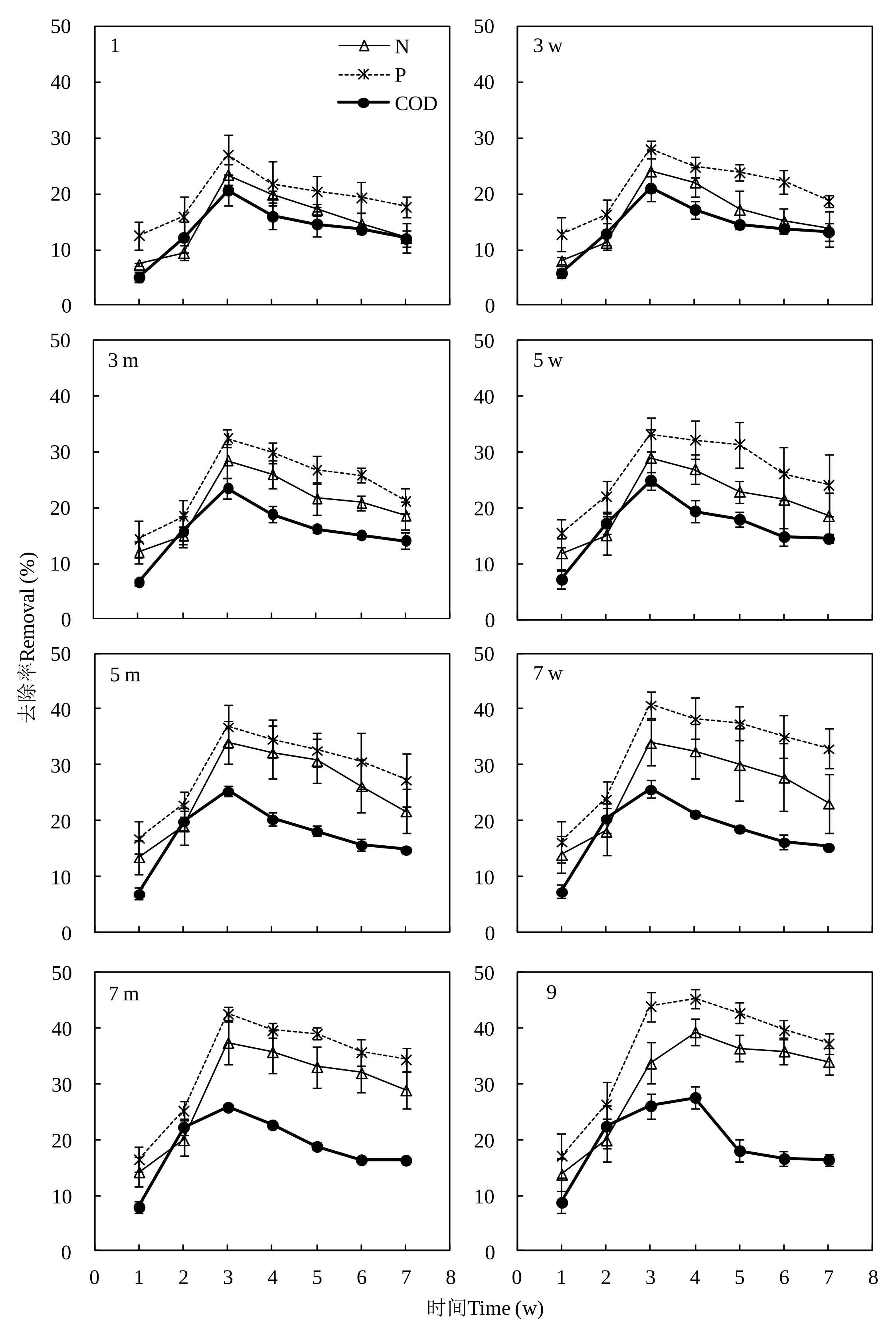
表 3 植物多样性及组合对 N、P、COD 去除率的影响

Table 3 Effects of species diversity and composition on N, P and COD removal

多样性及组合	去除率 Removal（%）		
Species richness and composition	N	P	COD
1	14.91 ±1.54^{dB}	19.28 ±1.45^{eA}	13.47 ±1.33^{dB}
3 w	15.95 ±1.65^{dB}	20.96 ±1.48^{deA}	14.08 ±1.26^{cdB}
3 m	20.34 ±1.63^{cA}	24.10 ±1.77^{dA}	15.69 ±1.38^{cB}
5 w	20.85 ±1.89^{cB}	26.38 ±1.96^{cdA}	16.58 ±1.46^{bcB}
5 m	25.40 ±2.24^{bA}	28.90 ±2.08^{cA}	17.37 ±1.50^{bB}
7 w	25.65 ±2.38^{bB}	32.17 ±2.46^{bA}	17.87 ±1.53^{abC}
7 m	28.74 ±2.40^{abA}	33.25 ±2.42^{abA}	18.59 ±1.52^{abB}
9	30.42 ±2.60^{aA}	36.01 ±2.79^{aA}	19.41 ±1.77^{aB}

注：w 与 m 分别表示湿地种占多数组合与中生种占多数组合。数据为双因素协方差分析后的修正平均值±标准误。同列不同小写字母表示多样性及组合间差异显著（P<0.05）；同行不同大写字母表示 N、P、COD 去除率间差异显著（P<0.05）。

Note: w and m represent species composition with more wetland plants and mesophytes, respectively. Data are adjusted $\bar{x}$ $\pm\bar{x}_s$ from two-way ANCOVA. Different small letters in each column indicate significant differences among species richness and composition (P<0.05). Different capital letters in each row indicate significant differences among N, P and COD removal (P<0.05).



注：w 与 m 分别表示湿地种占多数组合与中生种占多数组合。

Note: w and m represent species composition with more wetland plants and mesophytes, respectively.

图 3 实验期间不同植物多样性及组合的 N、P、COD 去除率

Fig. 3 N, P and COD removal of different species diversity and composition during the experiment

3. 讨论与结论

3.1 植物多样性及组合对生态浮床植物生长的影响

在植物群落中，植物多样性对某个物种来说既具有保育效应，也具有资源竞争效应，它们相对作用大小取决于物种特性，也取决于物种组合。本研究发现，同一植物多样性水平下不同物种组合对各植物的单株生物量及 RGR 均无显著影响，但随着多样性的增加，向日葵、商陆、苎麻的 RGR 显著增加。这三种植物都属于中生植物，如单独将它们应用于生态浮床系统中均难以存活。但通过与湿地植物搭配，它们均生长良好。在此期间，湿地植物根系泌氧（张太平和陈韦丽，2005）及其根系分泌物（Lambers et al，2015）可能促进了这些中生植物的生存与生长。

在自然条件下，本研究的主要对象芦竹一般以单优群落的形式出现，说明其种间竞争能力强，种内竞争能力弱。然而，人为增加其群落的物种多样性水平后，其种间竞争优势不但没有显现，其单株生物量及 RGR 反而随多样性增加呈下降的趋势。我们认为可能基于以下两个方面的原因：（1）芦竹第一年生长以垂直生长为主且相对缓慢，其对邻体植物的竞争优势较弱（Curt et al，2017）；（2）邻体物种反过来对芦竹有抑制效应（Curt et al，2017）。因此，芦竹在生态修复的初期，应以单植为主。

3.2 植物多样性及组合对系统生产力及 N、P、COD 去除率的影响

大多数研究发现，植物多样性与生产力之间呈显著正相关（Loreau & Hector，2001）。然而，本研究却发现了相反的结果。我们认为，除实验周期较短外，物种特异性或取样效应（sampling effect）是其中重要的原因。本研究以生长较快的芦竹为建群种和优势种（即每个物种组合都有芦竹），随着多样性的增加，芦竹的个体数减少，因而群落生产力呈下降趋势。在同一植物多样性水平，湿地植物种占多数的组合的生产力高于中生植物占多数组合的生产力，很明显，是因为湿地植物对水生环境的适应性强于中生植物的缘故。

随着植物多样性的增加，有研究发现湿地的 N 去除率显著增加（Ge et al，2015）。本研究通过增加生态浮床系统的植物多样性，同样发现水箱的 N 去除率及 P、COD 去除率显著增加。N、P、COD 的去除不但与植物的直接吸收及吸附有关，而且与植物对微环境的改变关系密切（李莎莎等，2010；蔡佩英等，2011；Liao et al，2017）。后者对 N 等的去除又可通过两种方式进行。第一，植物通过根排物（如羧化物、O_2）影响邻体植物对 N 等的吸收，如 Novak & Chan（2002）发现邻体植物可影响 P 富集植物的富集功能。第二，植物通过根系生长和根排物分泌影响根区微生物的增殖及多样性，而这些微生物的代谢作用对 N 等的去除贡献更大（袁东海等，2004；Ge et al，2015）。本研究发现随植物多样性的增加，N、P、COD 去除率与生产力的变化趋势正好相反，也说明除了植物的直接作用外，微生物的作用更重要。在同一多样性水平下，中生植物种占多数的组合的 N、P、COD 去除率高于湿地植物占多数的物种组合，其中 N 去除率达到显著水平。蔡佩英等（2011）认为，中生植物与湿地植物组合，有利于根部附近水体形成好氧-缺氧-厌氧的微环境，从而有利于好氧与厌氧微生物共存，促进了水体的净化。具体到 N 去除，湿地植物在根区形成好氧环境，易引起硝氮的大量累积（张志勇等，2007；Finlay et al，2013）。这时如增加中生植物的配置，其根区局部缺氧有利于反硝化细菌的生存与繁殖，从而显著促进了硝氮的反硝化脱氮。

自然状态下生活污水具有一定的自净功能（张志勇等，2007；Schlesinger，2009；Schindler，2012），因此本研究的 COD、N、P 去除率采用无植物生活污水作为对照的方法进行计算，以凸显植物的直接或间接净化效应。结果发现，随着生态浮床系统建立时间的增加，N、P、COD 去除率均呈现先快速增加后缓慢降低的趋势。王敏等（2013）与 Liao et al（2017）通过水培实验也发现了类似的规律。我们认为，植物经过短暂适应后其生长将加速，同时也促进了微生物的附着与增殖，故初期 N 等去除率快速增加。但随着时间的延长，植物生长减

缓、微生物也逐渐达到饱和，这时 N 等去除率也随之减缓。因此，Liao et al（2017）认为，为更有效地净化水体，及时收获地上部分或整株是必要且必需的。另外，Reich et al（2012）认为，随着建群时间的增加，种间互补越充分，因而，多样性与生态功能之间曲线的饱和点将随多样性的增加而延后。本研究发现，植物多样性最高（9 物种）时，其对 N 等去除的峰值比其它多样性水平延后 1 周，也说明互补效应（complementarity effect）是多样性促进 N 等去除的原因之一。

3.3 N、P、COD 去除率比较

Yan et al（2016）认为，工业革命以前淡水中 P 含量很低，因此大多数湿地植物在长期的选择压力下对 P 的吸收能力比 N 强。也就是说，湿地植物对水体中 P 的去除一般快于 N 的去除。本研究发现，P 的去除率确实高于 N 去除率。但我们认为，除了植物吸收的原因外，氧微环境或微生物作用也是 P 去除率高于 N 去除率的一个重要原因。相比 P 而言，N 的去除受氧微环境影响更大，因为后者的去除（反硝化作用）必须在厌氧条件下进行。也正因为此，如果水体表层含氧丰富，则容易造成硝氮污染（张志勇等，2007；Finlay et al，2013）。我们的研究也发现，中生植物种占多数时（厌氧微环境持续存在），P 去除率与 N 去除率差异不显著，但湿地植物种占多数时（主要为好氧微环境），P 去除率显著高于 N 去除率。与 N 相比，有机物的去除更依赖于微生物的分解（袁东海等，2004；李莎莎等，2010），而且植物的根排物也增加了水体的有机物含量。这些有机物如果没有通过分解成 CO_2 或甲烷溢出水体，则 COD 的去除率一般低于 N 去除率（Du et al，2010）。基于此，本研究发现了相同的趋势，也说明本研究生活污水中有机物以持久难分解有机污染物为主。

综上，改变以芦竹为建群种和优势种的植物多样性及组合对生态浮床系统的植株生长、系统生产力及 N、P、COD 的去除均具有显著影响。随着多样性的增加，湿地植物的单株生物量及 RGR 呈下降趋势，但中生植物的生存与生长受到促进。生产力随多样性的增加呈下降趋势，原因可能与特种特异性或取样效应有关。与此同时，N、P、COD 去除率却随多样性增加而显著增加，说明除了植物直接吸收与吸附外，微生物的去除作用更重要。同样，在同一多样性水平下，中生植物种占多数的组合虽然系统生产力低于湿地植物种占多数的组合，但前者的 N、P、COD 去除率高于后者。同一多样性及组合条件下，P 去除率最高， N 去除率次之，COD 去除率最低。随着生态浮床系统建立时间的增加，N 等去除率呈现先快速增加后缓慢降低的趋势。

参考文献：

CAI PY, LIU AQ, HOU XL, 2011. Study on effects of seven hydrophytes on nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage [J]. Chin J Environ Eng, 5 (5): 1067-1070. [蔡佩英，刘爱琴，侯晓龙, 2011. 7 种水生植物去除城市生活污水氮磷效果的研究 [J]. 环境工程学报, 5 (5): 1067-1070.]

CHANG J, FAN X, SUN HY, et al, 2014. Plant species richness enhances nitrous oxide emissions in microcosms of constructed wetlands [J]. Ecol Eng, 64: 108-115.

CURT MD, MAURI PV, SANZ M, et al, 2017. The ability of the *Arundo donax* crop to compete with weeds in central Spain over two growing cycles [J]. Ind Crop Prod, 108 (2017): 86-94.

DU XL, XU ZX, WANG S, 2010. Enhanced removal of organic matter and ammonia nitrogen in a one-stage vertical flow constructed wetland system [J]. Environ Prog Sustain, 29 (1): 60-67.

FINLAY JC, SMALL GE, STERNER RW, 2013. Human influences on nitrogen removal in lakes [J]. Science 342: 247-250.

GARNIER E, CORTEZ J, BILLÈS G, et al, 2004. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession [J]. Ecology, 85 (9): 2630-2637.

GE Y, HAN WJ, HUANG CC, et al, 2015. Positive effects of plant diversity on nitrogen removal in microcosms of constructed wetlands with high ammonium loading [J]. Ecol Eng, 82: 614-623.

HU ZF, CHEN AM, QIU Z, et al, 2016. The effects of plant species and plant diversity on nitrogen removal in simulated vertical sub-surface flow constructed wetlands [J]. Environ Poll Contr, 38 (3): 45-49. [胡智锋， 陈爱民， 裘知， 等, 2016. 模拟垂直潜流人工湿地中植物种类和植物多样性对脱氮效果的影响 [J]. 环境污染与防治, 38 (3): 45-49.]

HUSTON MA, 1997. Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity [J]. Oecologia, 110: 449-460.

LAMBERS H, HAYES PE, LALIBERTÉ E, et al, 2015. Leaf manganese accumulation and phosphorus-acquisition efficiency [J]. Trends Plant Sci, 20 (2): 83-90.

LI SS, TIAN K, LIU YG, et al, 2010. Compare the purification effects of sewage by the wetland plant community composition and spatial patterns [J]. Ecol Environ Sci, 19 (8): 1951-1955. [李莎莎，田昆，刘云根，等，2010. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究 [J]. 生态环境学报, 19 (8): 1951-1955.]

LIANG MQ, ZHANG CF, PENG CL, et al, 2011. Plant growth, community structure, and nutrient removal in monoculture and mixed constructed wetlands [J]. Ecol Eng, 37: 309-316.

LIAO JX, ZHANG DN, MALLIK A, et al, 2017. Growth and nutrient removal of three macrophytes in response to concentrations and ratios of N and P [J]. Int J Phytoremediat, 19 (7): 651-657.

LIAO JX, HUANG YQ, ZHANG DN, et al, 2018. An ecological floating bed without requiring to joint in the water [P]. Utility model patent, number: ZL201720167872.6. [廖建雄，黄玉清，张德楠，等, 2018. 一种无需下水作业的生态浮床 [P]. 实用新型专利，申请（专利）号: ZL201720167872.6.（申请日: 2017.2.23，授权日: 2018.1.19）]

LOREAU M, HECTOR A, 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments [J]. Nature, 412: 72-76.

NOVAK JM, CHAN ASK. 2002. Development of P hyperaccumulator plant strategies to remediate soils with excess P concentrations [J]. Crit Rev Plant Sci, 21 (5): 493-509.

REICH PB, TILMAN D, ISBELL F, et al, 2012. Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades [J]. Science, 336: 589-592.

SCHINDLER DW, 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes [J]. Proc Roy Soc B-Biol Sci 279: 4322-4333.

SCHLESINGER WH, 2009. On the fate of anthropogenic nitrogen [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 106: 203-208.

WANG M, TANG JC, WANG F, 2013. Remediation effect of common aquatic plants on the combined water pollution of eutrophication and heavy metals [J]. J Water Resour Water Eng, 24 (2): 50-56. [王敏，唐景春，王斐. 2013. 常见水生植物对富营养化和重金属复合污染水体的修复效果研究 [J]. 水资源与水工程学报, 24: 50-56.]

XIE LQ, XIE P, LI SX, et al, 2003. The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms [J]? Water Res, 37: 2073-2080.

YAN Z, HAN W, PEÑUELAS J, et al, 2016. Phosphorus accumulates faster than nitrogen globally in freshwater ecosystems under anthropogenic impacts [J]. Ecol Lett, 19: 1237-1246.

YU YB, HUANG Y, 2010. Review of reason and mechanism of black and stink in urban rivers [J]. Environ Sci Technol, 23 (S2): 111-114. [于玉彬，黄勇，2010. 城市河流黑臭原因及机理的

研究进展 [J]. 环境科技, 23(S2): 111-114.]

YUAN DH, REN QJ, GAO SX, et al, 2004, Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage [J]. Chin J Appl Ecol, 15 (12): 2337-2341. [袁东海, 任全进, 高士祥, 等, 2004. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较 [J]. 应用生态学报, 15 (12): 2337-2341.]

ZHANG CB, LIU WL, WANG J, et al, 2011. Effects of monocot and dicot types and species richness in mesocosm constructed wetlands on removal of pollutants from wastewater [J]. Bioresour Technol, 102 (22): 10260-10265.

ZHANG TP, CHEN WL, 2005. Advances in removal efficiency of nitrogen and phosphorus in constructed wetland ecosystem [J]. Ecol Environ, 14 (4): 580-584. [张太平, 陈韦丽, 2005. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展 [J]. 生态环境, 14 (4): 580-584.]

ZHANG ZY, FENG ML, YANG LZ, 2007. Nitrogen and phosphorus removal and N_2O emission from domestic sewage in floating-bed plant systems [J]. Acta Ecol Sin, 27 (10): 4333-4341. [张志勇, 冯明雷, 杨林章, 2007. 浮床植物净化生活污水中 N、P 的效果及 N_2O 的排放 [J]. 生态学报, 27 (10): 4333-4341.]

ZHU SX, GE HL, GE Y, et al, 2010. Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland [J]. Ecol Eng, 36 (10): 1307-1313.